

Рассмотрена задача повышения эффективности индукционного нагрева деталей в воздушном зазоре магнитопровода. Посредством моделирования в ANSYS Electromagnetics Suite 19.2 и экспериментальных исследований определены закономерности краевого эффекта в нагреваемой детали. Для обеспечения равномерности индукционного нагрева мелких деталей и сокращения времени пайки применен электрический замыкатель паяемых деталей, который с помощью прибора-регулятора образует вторичный контур с низким электрическим сопротивлением и высокой плотностью вихревых токов.

**Введение.** Индукционный нагрев деталей вихревыми токами широко применяется в серийном производстве благодаря высокой скорости, локальности зоны избирательного нагрева, использованию любой газовой среды (вакуума, защитного газа, воздуха), автоматизации процесса [1]. Наиболее часто применяют соленоидальные (кольцевые) индукторы с магнитопроводом и без него (рисунок 1, а). Выбор формы соленоида и магнитопровода зависит от геометрических размеров нагреваемых деталей, а также от их физических свойств. Индукторы соленоидального типа характеризуются значительным рассеянием магнитного потока, низким КПД (0,2...0,4), необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых поверхностей деталей и водяного охлаждения во время работы. Источники высокочастотной энергии – ламповые генераторы мощностью 10...50 кВт – имеют значительные массогабаритные характеристики и требуют принудительного воздушного или водяного охлаждения.

Figure 1 consists of two parts. Part (a) is a schematic diagram of a cylindrical inductor. It shows a cylindrical core with a red wire wound around it. The current flowing through the wire is labeled  $I_1$ . The magnetic field inside the core is labeled  $\vec{H}$ , and the magnetic flux is labeled  $\Phi$ . The core is connected to a circuit containing a voltage source  $G$  and a capacitor  $C$ . Part (b) is a 3D model of the inductor structure. It shows a green rectangular core with orange wire wound around it. The model is labeled with 1, 2, and 3, indicating different parts of the structure. A coordinate system with x, y, and z axes is shown at the bottom right.

**Рисунок 1. – Схемы индукционного нагрева соленоидальным индуктором (а) и в воздушном зазоре магнитопровода (б)**

60

При пайке нескольких проводов к плате тепло фокусируется таким образом, что изоляция на проводах не расплавляется [3]. Однако при индукционном нагреве в зазоре магнитопровода наблюдается «краевой эффект». Под ним понимается искажение электромагнитного поля и распределения источников теплоты в зоне концов нагреваемого тела (краевой эффект детали) или обмотки (краевой эффект индуктора). Сюда же относится искажение поля в зоне резкого изменения свойств нагреваемого тела, в частности на стыке ферромагнитной и немагнитной заготовок. Краевые эффекты индуктора и детали во многом определяют качество нагрева и энергетические характеристики устройств индукционного нагрева.

Цель представляемой работы – оптимизация параметров индукционного нагрева деталей в воздушном зазоре магнитопровода при пайке деталей и электронных компонентов в процессе сборки электронных модулей.

**Моделирование параметров индукционного нагрева.** Переменный магнитный поток, пронизывающий материал сердечника, вызывает появление в проводящем материале детали ЭДС индукции. Под действием ЭДС в детали возникают вихревые электрические токи, протекающие по замкнутым контурам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока. Вихревые токи создают свой магнитный поток, стремящийся в соответствии с правилом Ленца ослабить изменение основного потока. Вследствие этого они действуют размагничивающим образом, уменьшая основной поток [4].

Размагничивающее действие вихревых токов неодинаково в различных частях детали. Наиболее сильно оно выражено в центре сечения, так как центральные части охватываются максимальным числом контуров тока, магнитное поле которых и создают размагничивающий поток. Поэтому в центре сечения плотность основного магнитного потока будет меньше, чем на краях, т.е. происходит вытеснение основного магнитного потока в наружные слои детали. Это явление выражено тем резче, чем выше частота магнитного потока и больше сечение, магнитная проницаемость и удельная проводимость материала детали [5].

Моделирование распределения плотности вихревых токов в детали проводилось в пакете ANSYS Electromagnetics Suite 19.2. Для моделирования построена геометрическая модель устройства индукционного нагрева на магнитопроводе.

Моделирование процесса индукционного нагрева показало наличие неравномерности распределения вихревых токов в металлической детали (рисунок 2). Максимальная по модулю плотность токов (до  $5,6 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>) на частоте 66 кГц отмечена по краям детали, а минимальная ( $8,6 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>) – в центре зазора магнитопровода.

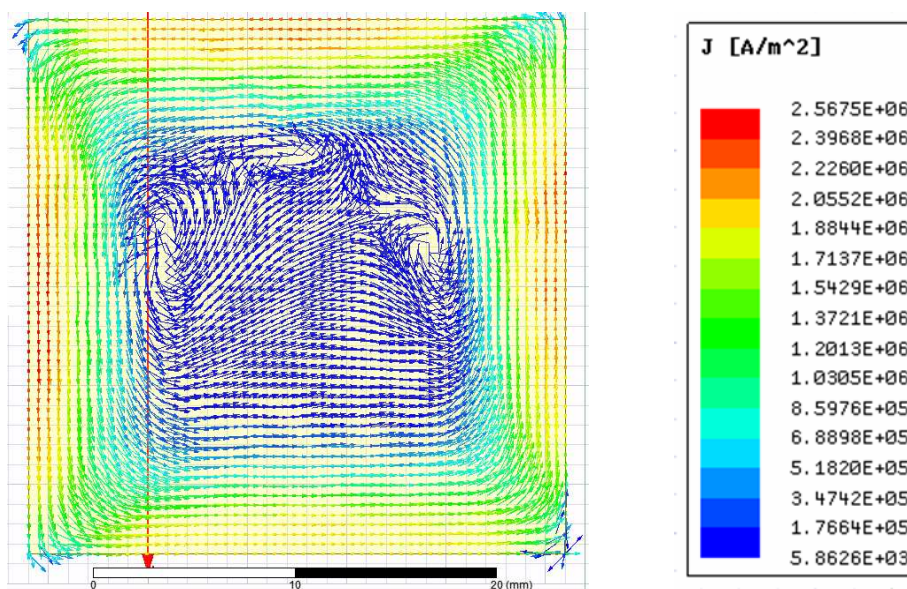


Рисунок 2. – Распределение плотности вихревых токов в детали на частоте 66 кГц

Моделирование электромагнитного поля в зазоре магнитопровода в САПР COMSOL Multiphysics для индукционного нагрева деталей из медных сплавов на частоте 66 кГц и силе тока 10А показало наличие нелинейной зависимости глубины прогрева от величины зазора (рисунок 3).

Замечено, что 90% энергии электромагнитного поля выделяется на расстоянии 2 мм от края детали. С ростом зазора мощность нагрева падает, но при этом увеличивается нагрев по остальному объему детали.

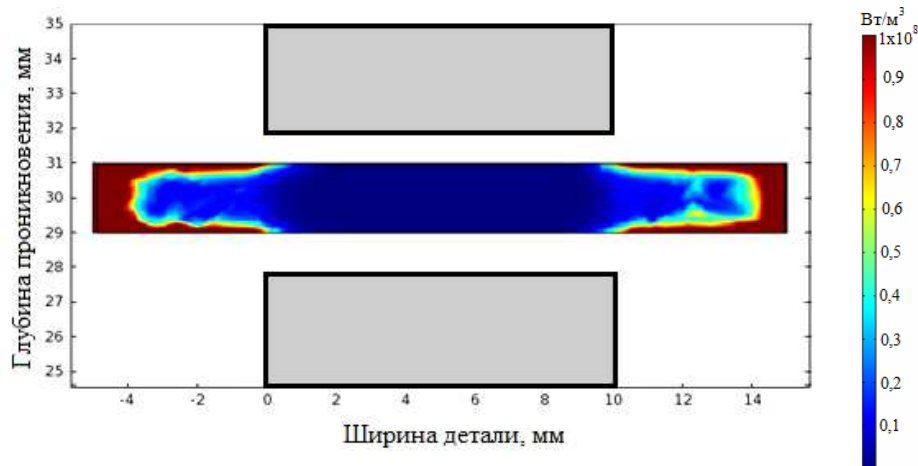
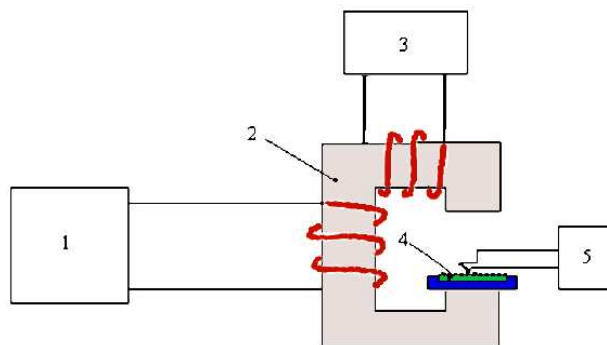


Рисунок 3. – Распределение удельной мощности нагрева (Вт/м³) по глубине и вдоль детали

**Экспериментальные исследования.** Индукционное устройство для формирования контактных соединений легкоплавкими припоями содержало П-образный магнитопровод из феррита марки 600 НН с незамкнутой магнитной цепью и две обмотки.

Индуктирующая обмотка подключалась к ВЧ-генератору 1 (рисунок 4). Параметры ВЧ-напряжения контролировали вольтметром В7-73/1 и частотомером ЧЗ-67. Температуру в рабочей зоне измеряли с помощью термопары ХК, прикрепленной к детали 4 и цифрового измерителя температуры ТРМ-205 5. Напряженность магнитного поля в зазоре магнитопровода 2 оценивали по величине ЭДС в измерительной рамке вольтметром типа В7-73/1. Для изменения магнитной проницаемости сердечника в дополнительную обмотку подавали постоянный или переменный ток подмагничивания величиной 1...5 А от источника 3 [4].



1 – генератор; 2 – магнитопровод; 3 – источник тока;  
4 – детали; 5 – измеритель температуры

Рисунок 4. – Схема индукционного нагрева в зазоре магнитопровода

Величина напряженности магнитного поля рассчитывалась следующим образом:

$$H = U_m / \mu_0 (4,44 \cdot S \cdot f \cdot w), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения на рамке;  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $S$  – площадь рамки;  $f$  – частота тока;  $w$  – число витков рамки.

Для практических расчетов выражение (1) приведено к более удобному виду:

$$H = 1,26 \cdot \frac{U(B)}{f(\text{МГц}) \cdot S}. \quad (2)$$

Экспериментально измерение напряженности магнитного поля проводилось рамкой из медного провода диаметром 0,8 мм, помещенной в воздушный зазор магнитопровода и подключенной к электронному вольтметру. В измерительной рамке наводилась ЭДС, которая затем пересчитывалась в напря-

женность поля. При частоте нагрева 66 кГц напряженность магнитного поля составила  $4,5 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>, а неоднородность поля – 1,3...1,4 относительно центра детали (рисунок 5).

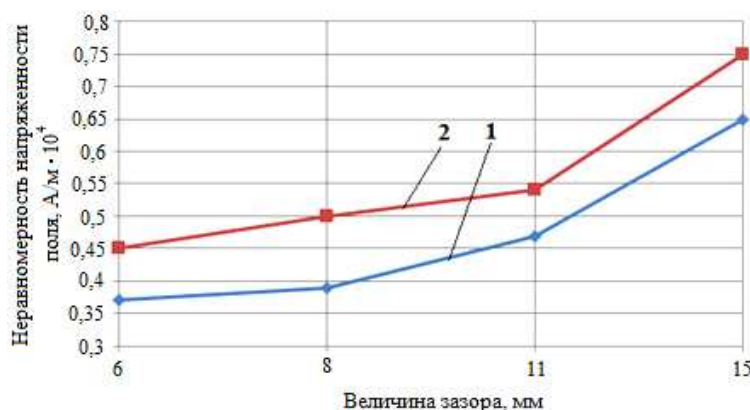


Рисунок 5. – Зависимости изменения напряженности относительно центра от величины зазора на частоте 66 кГц (1), на частоте 22 кГц (2)

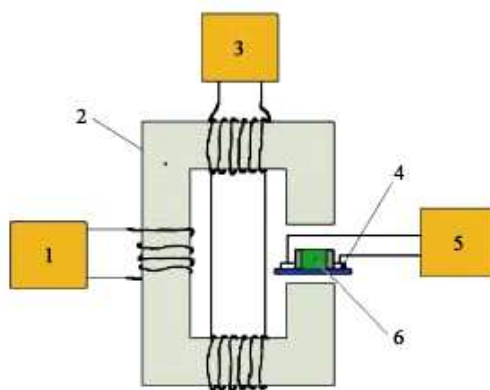
В результате краевого эффекта на краях детали, подвергаемой индукционному нагреву в воздушном зазоре магнитопровода, возникает разность потенциалов (таблица), которая зависит от мощности нагрева и от удельного сопротивления материала детали.

Таблица. – Величина разности потенциалов на краях детали при индукционном нагреве

Мощность нагрева, кВт	Разность потенциалов на краях латунной детали, В	Разность потенциалов на краях стальной детали, В
2,6	1,02	0,85
2,5	0,82	0,80
2,0	0,65	0,64
1,5	0,57	0,51
1,0	0,53	0,46

Для повышения эффективности индукционного нагрева деталей и компонентов в воздушном зазоре магнитопровода индуктора, сокращения времени пайки и снижения нагрева электронных компонентов в устройство индукционного введен электрический замыкатель тока, выполненный в форме пластины из проводящего материала, которая с помощью прибора-регулятора образует вторичный контур с низким электрическим сопротивлением и высокой плотностью вихревых токов. Это позволило регулировать величину плотности вихревых токов, протекающих через детали, устранить потери магнитного потока в окружающем пространстве и повысить эффективность индукционного нагрева.

На рисунке 6 представлена схема устройства индукционного нагрева при пайке.



1 – источник тока; 2 – магнитопровод; 3 – генератор;  
4 – электрический замыкатель; 5 – прибор-регулятор; 6 – паяемая деталь

Рисунок 6. – Устройство индукционного нагрева при пайке

Устройство состоит из генератора 1, магнитопровода с разомкнутой магнитной цепью 2 с индукционной обмоткой, разделенной на две равные части, подключенные к генератору 1, обмотки подмагничивания, подключенной к источнику тока подмагничивания 3, паяемых деталей 4, электрического замыкателя 5, выполненного в форме пластин из проводящего материала, и прибора-регулятора 6. С помощью электрического замыкателя 5 и прибора-регулятора 6 электрически соединяли паяемые детали 4, образуя в магнитном поле магнитопровода вторичный контур с низким электрическим сопротивлением. Прибором-регулятором 6 изменяли величину вихревых токов во вторичном контуре и тем самым скорость нагрева деталей. Повышение эффективности индукционного нагрева достигается за счет образования с помощью электрического замыкателя паяемых деталей и прибора-регулятора вторичного контура с низким электрическим сопротивлением, в котором создается повышенная плотность вихревых токов, что позволяет увеличить скорость и равномерность нагрева паяемых деталей и обеспечить тем самым высокое качество паяных соединений.

Индукционное устройство на магнитопроводе из феррита марки 600 НН, питаемое от генератора с частотой 66 кГц и мощностью 1,5 кВт, применено при пайке силовых контактов электронного модуля с помощью припойной пасты ПП-250. В образованном замкнутом вторичном контуре из паяемых контактов и электрического замыкателя величина вихревых токов регулировалась прибором в пределах 6...10 А. Скорость индукционного нагрева возросла в 2 раза и составила 50 °С/с.

**Выводы.** Учёт краевого эффекта индукционного нагрева при нагреве деталей в воздушном зазоре магнитопровода позволяет более точно установить оптимальный температурный профиль нагрева и тем самым обеспечить равномерность нагрева деталей малых размеров в процессах пайки или термообработки.

Для повышения эффективности индукционного нагрева мелких деталей в воздушном зазоре магнитопровода индуктора и сокращения времени пайки в устройство индукционного нагрева введен электрический замыкатель паяемых деталей, который с помощью прибора-регулятора образует вторичный контур с низким электрическим сопротивлением и высокой плотностью вихревых токов. Это позволяет регулировать величину плотности вихревых токов, протекающих через детали, устранить потери магнитного потока в окружающем пространстве и повысить эффективность индукционного нагрева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. – Paris, U.I.E., 1992. – 142 p.
2. Румак, Н.В. Экономичный бесконтактный нагрев энергией переменного магнитного поля / Н.В. Румак, В.Л. Ланин, И.Н. Чернышев // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 2. – С. 94–96.
3. Kyle, C. Embedded High-Power-Density Heating / C. Kyle // Industrial Heating. – 2008. – № 9. – Р. 88–90.
4. Васильев, А.С. Моделирование вихревых токов при индукционном нагреве в зазоре магнитопровода / А.С. Васильев, В.Л. Ланин // Приборостроение 2016 : материалы 9-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ. – 2016. – С. 282–283.
5. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 142 с.
6. Устройство индукционного нагрева при пайке : пат. BY 9156 / В.Л. Ланин. – Оpubл. 01.02. 2013.

Поступила 14.02.2019

#### EDGE EFFECTS OF INDUCTION HEATING OF PARTS IN AIR GAP OF MAGNETIC CIRCUIT

V. LANIN, Y. GRISHCHENKO, A. HATSKEVICH

*The problem of increasing the efficiency of induction heating of parts in air gap of the magnetic circuit is considered. Through modeling in ANSYS Electromagnetics Suite 19.2 and experimental studies identified patterns of edge effect in the heated parts. To ensure the uniformity of induction heating of small parts and reduce the soldering time, the electrical switch of soldered parts is used, which with the help of device controller forms a secondary circuit with low electrical resistance and high density of eddy currents.*

**Keywords:** induction heating, magnetic circuit gap, boundary effect, secondary circuit.